

論文 桁端部の変位拘束による PC 斜張橋の地震応答低減効果

阿部 弘典*1・幸左 賢二*2・西岡 勉*3・田崎 賢治*4・

要旨：河川内に主塔を有する既設の PC 斜張橋を対象に，主桁端部と側径間橋脚の間にゴム製の間詰材を充填する耐震補強工法を提案し，主塔部の地震慣性力を端部橋脚に分散させる場合の応答低減効果について検討した。各種地震動を入力した地震応答解析の結果，間詰材の設置個数および端部橋脚の曲げ耐力の増加に伴い，桁端部の水平変位拘束効果が高まり，主塔部橋脚の最大応答が低減されることを示した。

キーワード：PC斜張橋，桁衝突，間詰材，地震応答解析，応答低減効果

1. はじめに

兵庫県南部地震以降，大規模地震に対する橋梁の耐震設計では，上部構造の水平変位が大きくなることにより，支承構造や橋脚断面，また，基礎構造が震災前と比べて大きくなっている。特に，既設の耐震補強では，河川橋や湖面橋等大規模な仮締切りが必要となる施工条件の厳しい橋梁において，一般的な耐震補強方法では多額の工事費を必要とするといった課題がある。したがって，限られた予算の中で，より経済性，施工性に優れる合理的な耐震補強技術の開発が求められている。

筆者らはこれまで両端部に橋台を有する桁橋を対象に，桁遊間部にゴム等の間詰材を充填し，橋台部の水平抵抗を考慮する耐震補強工法を提

案し，その効果を明らかにしている¹⁾。

本研究では，図-1に示すような河川内に主塔を有する PC 斜張橋に適用範囲を拡張させ，主桁と端部橋脚の間に間詰材を充填し，地震慣性力を端部橋脚に分散させる場合の地震応答低減効果を確認し，入力地震動をパラメータとした場合の，主塔部橋脚における地震応答低減効果について検討した。

2. 対象橋梁

対象橋梁は，図-1に示すような橋長 400m の既設の PC2 径間連続斜張橋である。主塔主桁部の結合条件は剛結となっており，端部橋脚は可動支承である。主塔は逆 Y 字型の RC 柱で高

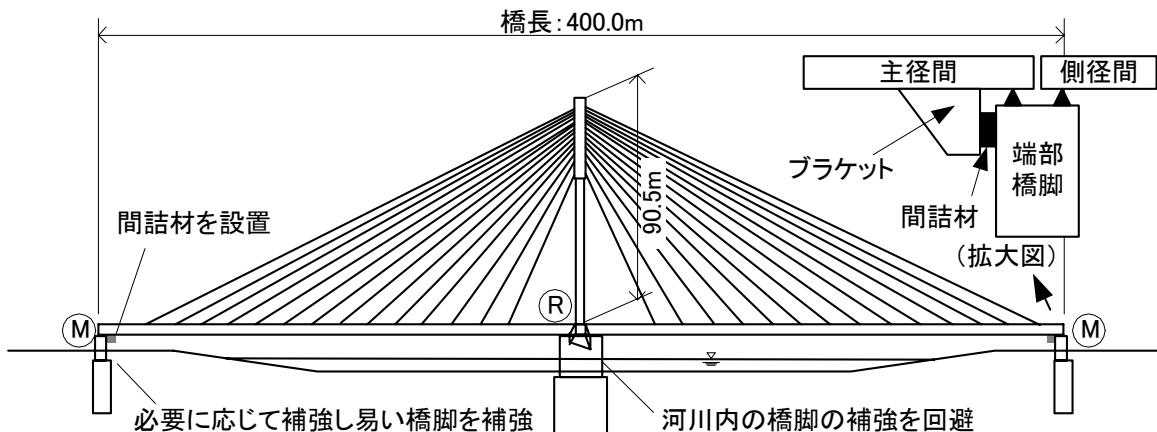


図-1 対象橋梁

*1 九州工業大学大学院 工学研究科 建設社会工学専攻 (正会員)

*2 九州工業大学 工学部 建設社会工学科 Ph.D. (正会員)

*3 阪神高速道路株式会社 湾岸管理部 博(工) (正会員)

*4 大日本コンサルタント株式会社 構造事業部 保全事業推進室 工修 (正会員)

さ 90.5m, 斜材は 2 面吊りである。主桁は桁高 2.8m, 全幅員 20.7m の斜めウェブを有する 4 室箱桁断面である。また, 主塔部橋脚は幅 5.5m, 長さ 18.0m の小判型断面の RC 柱, 端部橋脚は 4.5m の正方形断面の RC 柱であり, 基礎構造は何れもケーソン基礎である。なお, 本橋は河川を 24.5° の斜角で渡河する平面線形であることから, 河川内に位置する主塔部橋脚が図-2 に示すように, 斜角を有している。また, 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編によると, 地盤条件は 1 種地盤であり, 地震時に液状化は生じないと判定されている。

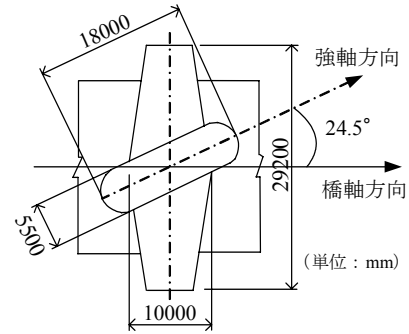


図-2 主塔部橋脚の平面図

3. 解析方法

3.1 解析モデル

図-1 に示す斜張橋主径間部を, 図-3 に示すように 3 次元フレームにモデル化した。主塔, 主桁, 橋脚は弾塑性はり要素, 斜材のケーブルはトラス要素を用いており, 基礎は集中バネに置き換えている。また, 主桁の曲げ, たわみ, ねじりを斜材に確実に伝達するために, 横桁を剛部材として設置している。弾塑性はり要素における曲げの非線形特性は, 自重解析により求めた初期軸力を用いてひび割れを考慮したトリリニア型とし, 主塔および橋脚に関しては武田モデルを, 主桁に関しては原点指向型モデルを用いている。なお, 本橋は図-2 に示したように, 主塔部橋脚の斜角が 24.5° であり, 橋脚の強軸方向が橋全体の橋軸方向に近い特性を有するため, 2 軸曲げの影響は考慮していない。一方, ケーブル質量はトラス要素端部の, 主塔および主桁の節点上に 1/2 ずつ振り分けて付加している。支承条件は, 鉛直および橋軸直角方向が固定となっている。

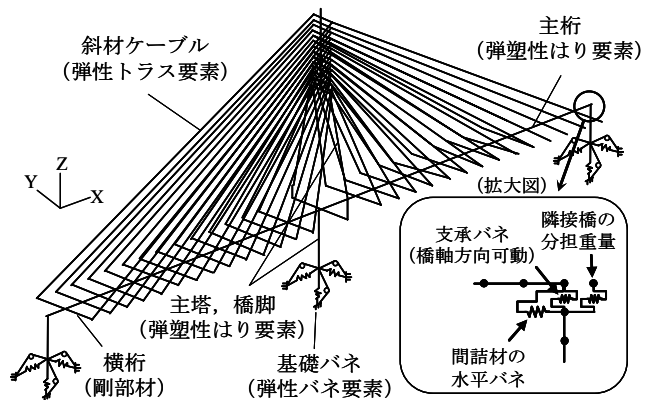


図-3 解析モデル

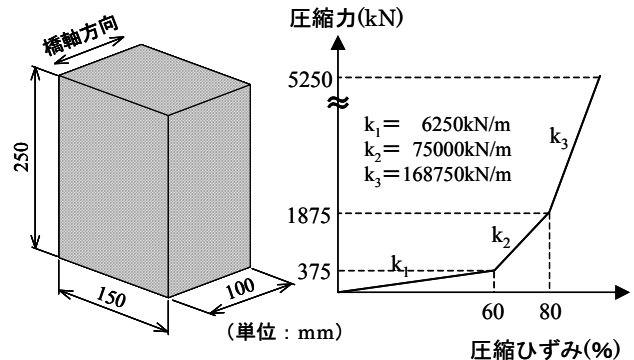


図-4 間詰材のモデル化

向上させることを目的として検討を行う。

3.3 間詰材のモデル化

間詰材は図-1 に示すように, 桁下端部に鋼製のブラケットを設置し, ブラケットと橋脚の間に設置する。ここで, 間詰材は衝突に伴う高ひずみ, 高面圧下においても荷重の繰り返し回数や載荷速度に対して安定した圧縮性能を発揮することが求められる。したがって, 既往の実験結果²⁾より, これらの性能を有する間詰材として, 図-4 に示す圧縮力-圧縮ひずみ関係を有するゴム製の間詰材を用いている。なお, ゴムの厚さは主桁の常時の温度伸縮量 50mm を吸

収できるように、100mmとしている。また、間詰材の履歴特性は、履歴吸収エネルギーを考慮しない逆行型としている。

3.4 解析手法

時刻歴応答解析における数値積分には、ニューマークの β 法($\beta=1/4$)を用い、数値積分間隔は $\Delta t=1/1000$ 秒とした。各非線形部材の履歴減衰の他に、粘性減衰定数として、主桁、主塔、橋脚およびケーブルは2%、基礎は20%、剛部材は0%とし、橋全体の粘性減衰として、レーリー減衰を用いている。

3.5 固有値解析結果と入力地震動

現況での1次～10次モードの固有周期と刺激係数を表-1に示す。これによると、橋軸方向の卓越モードは1次の他に、2次、5次、8次、9次となっており、斜張橋特有の高次のモードが卓越する結果となる。

解析に用いる入力地震動は、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台(NS)、断層破壊を考慮した想定地震波(NS)、台湾集集地震で観測された長周期成分が卓越するTCU068(EW)の3波を用い、橋軸方向に入力している。なお、想定地震波に関しては、架設地点近傍における断層破壊のシナリオを抽出し、短周期成分を統計的グリーン関数法で、長周期成分を詳細3次元差分法で、それぞれ求めた波形をハイブリッド法により合成した波形となっている。なお、図-5に各種地震波の加速度応答スペクトルを示す。

4. 補強ケースの検討

4.1 間詰材の設置個数を変化させた場合

本橋における補強ケースを検討するため、間詰材の設置個数と端部橋脚の曲げ耐力および剛性をパラメータとして地震応答解析を行った。なお、入力地震動には基本ケースとして、海洋気象台の波形を橋軸方向に入力している。

まず、端部橋脚の耐力を現況のまま、間詰材の設置個数を50～250個まで変化させた場合の、主塔部橋脚に作用する強軸方向の最大応答せん断力を図-6に示す。これによると、主塔部橋脚の最大応答せん断力は、間詰材の設置個数の

表-1 固有値解析結果

次数	固有周期(sec)	刺激係数		
		X	Y	Z
1	3.078	-9.0	5.1	0.0
2	1.946	-8.1	36.7	0.0
3	1.557	0.0	0.0	-37.1
4	1.182	0.0	0.0	0.0
5	1.000	9.8	4.0	0.0
6	0.945	0.0	0.0	12.4
7	0.873	1.2	-35.6	0.0
8	0.686	-35.4	-7.3	0.0
9	0.651	19.2	-4.0	0.0
10	0.575	0.0	0.0	17.0

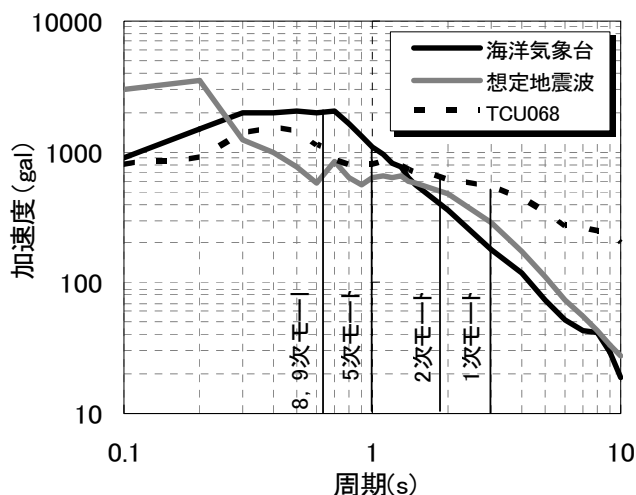


図-5 加速度応答スペクトル

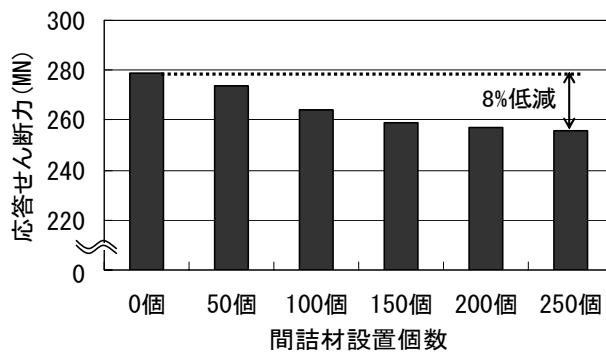


図-6 主塔部橋脚の最大応答

増加に伴って小さくなるが、低下率は最大で8%と小さい。ここで、図-7に間詰材の応答履歴を、図-8に主塔部橋脚の最大応答せん断力発生時における主桁端部、端部橋脚天端、間詰材の橋軸方向の変位をそれぞれ示す。図-7より、設置個数が増加するとバネ定数が大きくなるため、間詰材自体の変位は小さくなるが、作用する上部工慣性力が大きくなる。その結果、図-8に示すように端部橋脚の応答変位は、現況では上部工慣性力が作用しないため小さな値とな

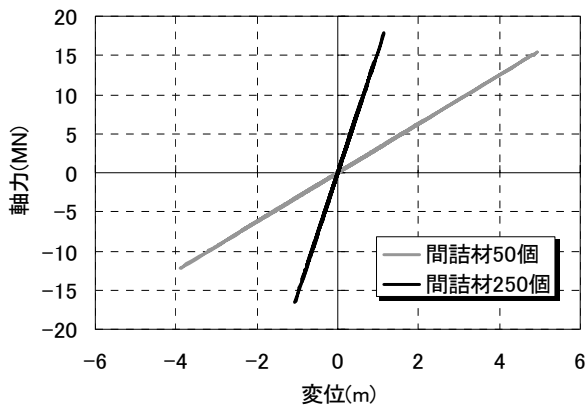


図-7 間詰材の荷重-変位関係

っているが、間詰材の設置個数が増加するに従って端部橋脚に作用する上部工慣性力が大きくなるため、端部橋脚が塑性化し応答変位も大きくなる。しかしながら、端部橋脚の変位の増加量に比べて間詰材の変位の低下量の方が多いため分かる。

4.2 端部橋脚の曲げ耐力を増加させた場合

次に、間詰材の設置個数を最も低減効果の高かった 250 個に固定し、端部橋脚の曲げ耐力を現況の 4 倍まで変化させた場合の、主塔部橋脚に作用する強軸方向の最大応答せん断力を図-9 に示す。これによると、端部橋脚の曲げ耐力の増加に伴い主塔部橋脚の最大応答せん断力が低減されており、曲げ耐力 2 倍以上では、最大応答せん断力がコンクリート標準示方書より算出したせん断耐力以下に収まる結果となる。また、間詰材の設置個数を増加させた場合に比べて低減率が大きくなっており、曲げ耐力を 4 倍にすると最大で 34% の低減効果が得られる。ここで、端部橋脚基部の強軸方向の応答履歴を図-10 に、主塔部橋脚の最大応答せん断力発生時における、主桁端部、端部橋脚天端、間詰材の橋軸方向の変位を図-11 に、それぞれ示す。図-10 より、曲げ耐力の増加に伴って水平抵抗、即ち端部橋脚による変位拘束力が大きくなるため、応答塑性率は大きく低減されている。特に、曲げ耐力を 4 倍とした場合は弾性状態に収まっている。したがって、図-11 に示すように、曲げ耐力の増加に伴って端部橋脚の変位が大きく低下するため、主桁端部の水平変位が抑制され、主塔部橋脚の応答が低減される結果となる。

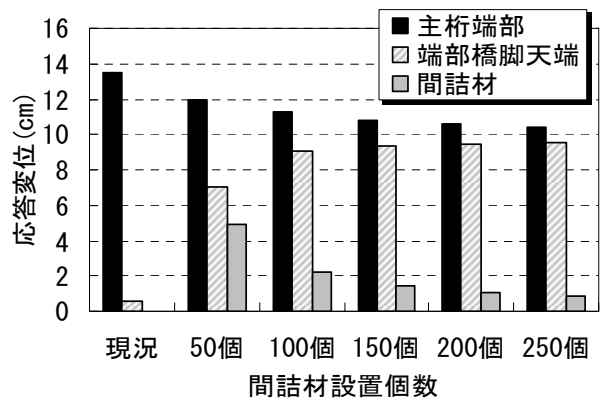


図-8 最大応答時における各部材の変位

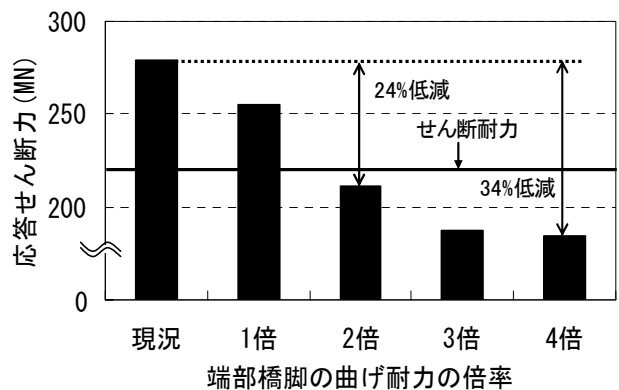


図-9 主塔部橋脚の最大応答

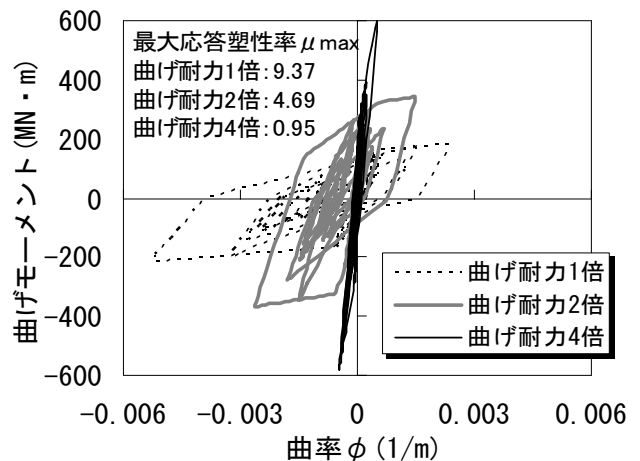


図-10 端部橋脚基部の応答履歴

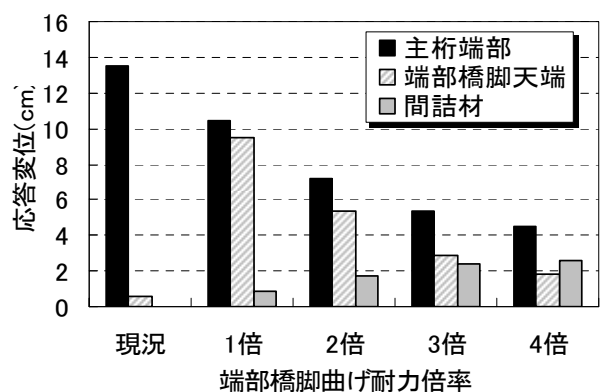


図-11 最大応答時における各部材の変位

以上より、間詰材の設置個数および端部橋脚の曲げ耐力が増加するにしたがって、主桁端部の水平変位が抑制され、主塔部橋脚の応答が低減されるが、端部橋脚の曲げ耐力を増加させた方が、変位拘束効果が高くなる結果が得られた。

なお、本橋における補強ケースを検討する場合、図-9で示したように、曲げ耐力を2倍にすることで、主塔部橋脚の応答せん断力がせん断耐力以内に収まること、また、端部橋脚の曲げ耐力を4倍とすることで、図-10で示したように端部橋脚が弾性状態となることから、これ以上曲げ耐力を増加させても、更なる変位拘束効果の増大は見込めないことが推測される。以上より、補強の規模などを踏まえた結果、間詰材の設置個数を250個、端部橋脚の曲げ耐力を2倍に補強するケースを、補強後の基本ケースとして設定した。

5. 各種地震波に対する検討

前章では、本橋における補強ケースを検討したが、本橋は長大PC斜張橋であり、地震時挙動が複雑かつ長周期構造物であるため、長周期地震動に対する耐震性を検討する必要がある。そこで、図-5に示した各種地震波を用いて動的解析を行い、主塔部橋脚の最大応答低減効果を検討した。

まず、図-12に主塔部橋脚に強軸方向の作用する最大応答せん断力を示す。これによると、何れの地震波を入力した場合でも、補強後は主塔部橋脚の最大応答は低減されているが、最大応答低減率は入力地震波によって異なり、TCU068入力時には15%、想定地震波入力時には10%程度と、海洋気象台入力時に比べて効果は小さい結果となる。次に、図-13に主塔部橋脚に作用する強軸方向の時刻歴応答せん断力波形を示す。図より、入力地震動が異なると波形の周期が異なるが、補強前後で最大応答発生時刻や応答特性は変化していないことから、最大応答のみが低減されていることが分かる。

ここで、主塔部橋脚の最大応答せん断力発生時における、斜張橋の変形状態を図-14に、強

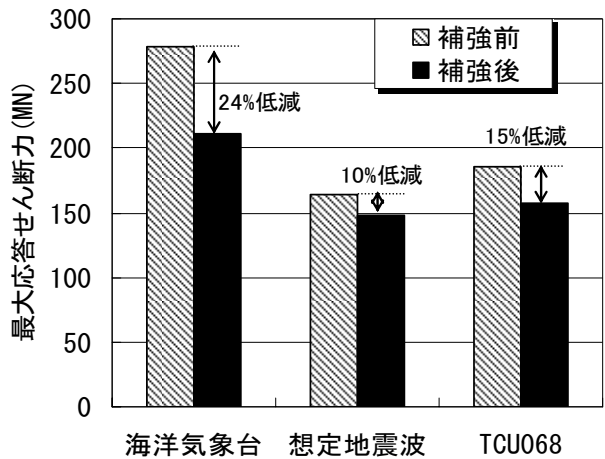
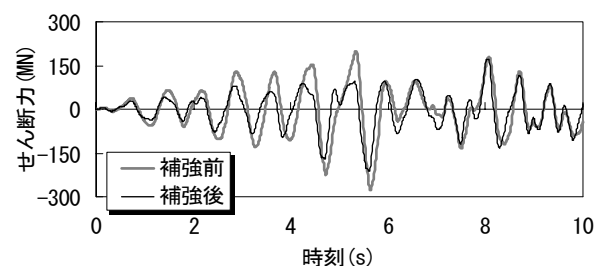
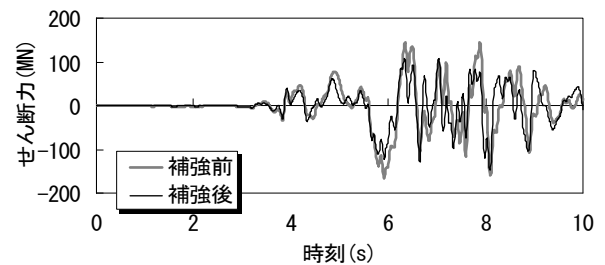


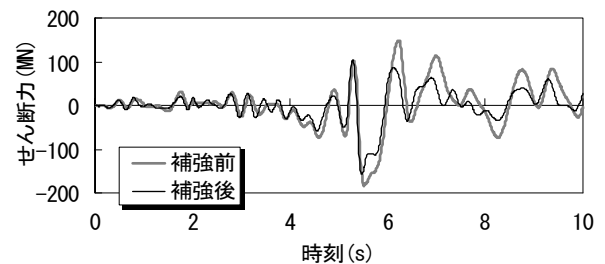
図-12 主塔部橋脚の最大応答せん断力



(a) 海洋気象台波形入力時



(b) 想定地震波入力時



(c) TCU068 入力時

図-13 主塔部橋脚の時刻歴応答せん断力

軸方向の主要なモードを図-15にそれぞれ示す。なお、補強前後の差を判別しやすくするために、変形状態は応答変位を200倍にして表記している。これによると、入力地震波が異なると最大応答時の変形状態も異なり、海洋気象台を入力した場合は8次モード、想定地震波を入力した場合は5次モードに近い変形状態となっており、想定地震波やTCU068を入力した場合

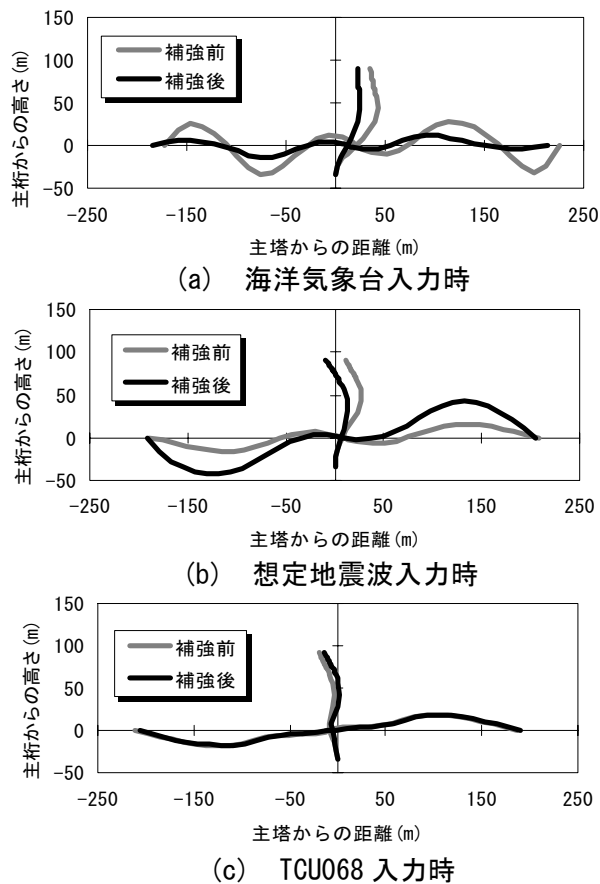


図-14 最大応答時における変形状態

は、主塔には高次モード、主桁には低次モードの影響が現れる複雑な変形状態となっている。これは、表-1の固有値解析結果に示したように、本橋の橋軸方向に対する刺激係数が、1次に比べて5次、8次、9次の方が大きくなっており、主塔部に関しては変形時に高次モードの影響が現れやすくなったためだと考えられる。このように、主塔の高次モードや入力地震動の卓越周期帯の影響により、最大応答時の変形状態や波形の周期が異なると考えられる。また、図-14によると、補強後は想定地震波を入力した場合の主桁を除いて、各部材の応答変位が抑制されていることが分かる。

6. まとめ

以上より、主塔部に作用する地震慣性力を端部橋脚に分散させる場合の応答低減効果について、本論文で用いた入力地震動に対して得られた知見を以下に示す。

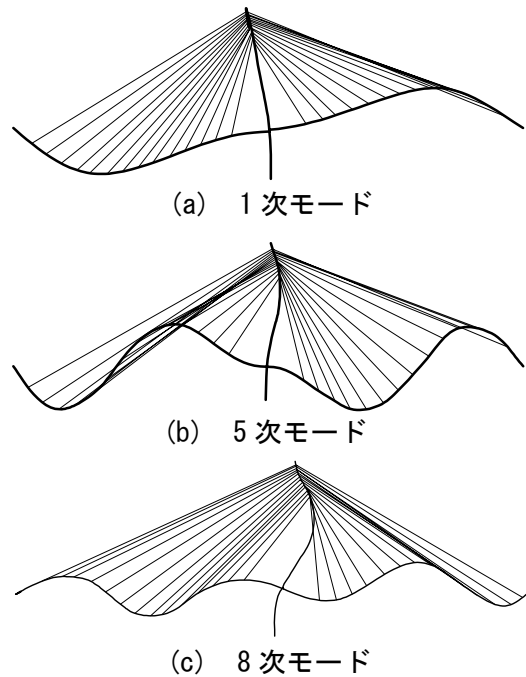


図-15 橋軸方向に卓越する主要なモード

- (1) 間詰材の設置個数の増加に伴い主塔部橋脚の最大せん断力は低減され、間詰材を250個設置すると、現況の8%程度低減される結果となった。
- (2) 端部橋脚の曲げ耐力を増加させることで変位拘束効果が高まり、主塔部橋脚の最大応答せん断力は曲げ耐力を4倍にすると、現況の34%低減される結果となった。
- (3) 主塔部橋脚が最大応答時の変形状態は、入力地震動の特性や高次モードの影響により、複雑な形状となる。
- (4) 桁端部の水平変位を拘束することで斜張橋全体系の応答変位が低減されており、橋脚を直接補強しない耐震補強策として、有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 田崎賢治, 幸左賢二, 阿部弘典, 新井伸博: 橋の桁遊間部に間詰材を充填する地震慣性力の低減効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.2, pp. 1171-1176, 2004.7
- 2) 川島一彦, 庄司 学: 衝突緩衝用落橋防止システムによる桁間衝突の影響の低減効果, 土木学会論文集 No.612/I-46, pp. 129-142, 1999.1